

(19)



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11)

**EP 0 657 011 B1**

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**20.01.1999 Patentblatt 1999/03**

(21) Anmeldenummer: **94923708.5**

(22) Anmeldetag: **01.07.1994**

(51) Int Cl.<sup>6</sup>: **F23C 11/00, F24H 1/40**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP94/02156**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 95/01532 (12.01.1995 Gazette 1995/03)**

(54) **BRENNER**

BURNER

BRULEUR

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE CH DE DK ES FR GB GR IE IT LI NL PT SE**

(30) Priorität: **02.07.1993 DE 4322109**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**14.06.1995 Patentblatt 1995/24**

(73) Patentinhaber:  
• **APPLIKATIONS- UND TECHNIKZENTRUM FÜR ENERGIEVERFAHRENS-, UMWELT-, UND STRÖMUNGSTECHNIK**  
**92237 Sulzbach-Rosenberg (DE)**  
• **Durst, Franz, Prof. Dr.**  
**91094 Langensendelbach (DE)**  
• **Trimis, Dimosthenis**  
**90419 Nürnberg (DE)**

(72) Erfinder:  
• **DURST, Franz**  
**D-91094 Langensendelbach (DE)**  
• **TRIMIS, Dimosthenis**  
**D-90419 Nürnberg (DE)**

• **DIMACZEK, Gerold**  
**D-91052 Erlangen (DE)**

(74) Vertreter:  
**Fehners, Klaus Friedrich, Dipl.-Ing.,**  
**Dipl.-Wirtsch.-Ing. et al**  
**Patentanwälte**  
**Geyer, Fehners & Partner**  
**Perhamerstrasse 31**  
**80687 München (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**EP-A- 0 256 322 EP-A- 0 261 622**  
**US-A- 5 165 884**

• **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 7, no. 257**  
**(M-256) (1402) 16. November 1983 & JP,A,58 140**  
**511 (MATSUSHITA) 20. August 1983**  
• **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 8, no. 154**  
**(M-310) (1591) 18. Juli 1984 & JP,A,59 049 403**  
**(RIYOUZOU ECHIGO) 22. März 1984**  
• **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 11, no. 102**  
**(M-576) (2549) 31. März 1987 & JP,A,61 250 409**  
**(TOSHIBA) 7. November 1986**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

**EP 0 657 011 B1**

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf einen Brenner mit einem Gehäuse, das einen Brennraum mit einem Einlaß für ein Gas-/Luftgemisch als Brennstoff und einen Auslaß für das Abgas aufweist.

Brenner dieser Art arbeiten üblicherweise mit einer in dem Brennraum frei brennenden Flamme, die das Gas-/Luftgemisch verbrennt, wobei das heiße Abgas als Wärmequelle verwendet wird. Insbesondere wird das heiße Abgas zum Wärmetauschen an wasserführenden Rohren vorbeigeführt, um in diesen heißes Wasser oder Dampf zu erzeugen.

In solchen Brennern werden Schadstoffe wie  $\text{NO}_x$  oder CO gebildet. Diese giftigen und gesundheitsschädlichen Gase entstehen entweder bei hoher Flammtemperatur bzw. bei unvollständiger Verbrennung in instabilen Flammen bzw. bei niedriger Flammentemperatur, die zwar reduziert werden könnte, dann aber entsteht eine instabile Flamme. Ferner ist auch eine unvollständige Verbrennung des Gas-/Luftgemisches zu erwarten, die den Wirkungsgrad herabsetzt.

Um diese Nachteile zu vermeiden wurden verschiedene Brennertypen entwickelt. Ein Überblick ist in "Lean-Burn Premixed Combustion in Gas Turbine Combustors", A. Saul und D. Altemark, Vulkan-Verlag, Essen, Band 40 (1991) Heft 7-8, S. 336-342 dargestellt. Wesentliches Merkmal bei den dort beschriebenen Entwicklungen zur Reduzierung von Schadstoffen ist vor allem eine niedrige Flammtemperatur, wobei verschiedene Maßnahmen getroffen sind, die Brennstoffe möglichst vollständig zu verbrennen. Die wichtigsten Maßnahmen zur Erzielung einer effizienteren Verbrennung sind die Überstöchiometrie und die Katalyse. Beispielsweise ist in der genannten Druckschrift eine im Forschungsstadium befindliche Fett-Quensch-Mager-Verbrennungskammer von General Electric "LM 2500" angegeben, bei der in einer ersten Stufe ein brennstoffreiches Gemisch verbrannt wird. In einem Zwischenbereich wird dem in der ersten Stufe teilweise verbrannten Gas Luft zugeführt und in einer zweiten Stufe das dadurch entstehende Magergemisch verbrannt. Für diesen Brenner wird von den Autoren ein  $\text{NO}_x$  Gehalt von  $< 190 \text{ mg/m}^3$  Gas angegeben.

Die obengenannte Druckschrift beschreibt auch die Verbrennung mit Hilfe von Katalysatoren, mit denen eine vollständige Verbrennung bei geringer Temperatur erreicht werden kann. Die Druckschrift gibt für die katalytische Verbrennung einen  $\text{NO}_x$  Gehalt von  $< 20 \text{ mg/m}^3$  an. Die katalytische Verbrennung ist bei mehreren Forschungsstätten in Entwicklung, die aber bisher noch nicht über das Forschungsstadium hinaus fortgeschritten ist. Nach Meinung der Autoren kann nicht erwartet werden, daß diese Art von Brennern innerhalb der nächsten 5 Jahre kommerziell einsetzbar ist.

In der genannten Druckschrift werden Stabilitätsprobleme nicht detailliert diskutiert. Sie werden aber um so wichtiger, je geringer die Flammtemperatur gewählt

wird.

Eine Möglichkeit für die stabile Verbrennung bei niedrigen Temperaturen ist in "Neue Gasbrenner- und -gerätechnik", ein Beitrag der Gaswirtschaft zum Umweltschutz, Otto Menzel, gwf Gas/Erdgas 130, 1989, Heft 7, S. 355-364 und in "Entwicklung eines schadstoffarmen Vormischbrenners für den Einsatz in Haushalts-Gasheizkesseln mit zylindrischer Brennkammer", H. Berg und Th. Jannemann, Gas Wärme International, Band 38 (1989), Heft 1, S. 28-34, Vulkan-Verlag, Essen angegeben. Der dort beschriebene "Thermomax"-Brenner hat nur einen geringen  $\text{NO}_x$  Ausstoß. Die Flammstabilität wird bei diesem Brenner durch eine wärmeabführende Brennerplatte erreicht, die im wesentlichen aus einem Lochblech mit kreisrunden Bohrungen besteht, durch welche das zu verbrennende Gas strömt. Die Flamme wird aufgrund der Wärmeabführung über das Lochblech praktisch an der Brennerplatte festgehalten, wodurch eine stabile Flamme entsteht.

Die Brennerplatte ist aber auch nicht ausreichend, um die Flammenstabilität bei allen Betriebsparametern zu gewährleisten. So wird angegeben, daß bei hohen Luftzahlen eine Gemischvorwärmung von rund  $300^\circ\text{C}$  vorgesehen sein sollte, da sich hierdurch die Verbrennungsgeschwindigkeit erhöht und damit die Abhebenneigung für die Flammen verringert wird.

US-A-5 165 884 offenbart eine Flammenstabilisierung mittels eines Regelprozesses bei dem eine Temperaturerfassung erfolgt, wie beispielsweise schon aus Anspruch 1 Merkmal b) der Druckschrift hervorgeht. Dazu werden Temperaturen an mehreren Stellen im Reaktor gemessen und die Flußrate und/oder Flußmenge in Abhängigkeit der Temperaturänderungen in der zur Verbrennung vorgesehenen Matrix gesteuert.

Aus dem zitierten Stand der Technik wird deutlich, daß es möglich ist, eine Reduzierung von Schadstoffen durch niedrige Flammtemperatur zu erreichen, wobei aber die Stabilität der Flamme weiterhin ein wesentliches, ungelöstes Problem darstellt.

Aufgabe der Erfindung ist es deshalb, einen Brenner zu schaffen, bei dem die Flamme bei niedriger Temperatur und Schadstoffemission stabil brennt.

Ausgehend vom US-A-5 165 884 wird die Aufgabe durch ein Brenner gemäß Anspruch 1 gelöst. Das Gehäuse enthält dabei ein poröses Material mit zusammenhängenden Hohlräumen, dessen Porosität sich längs des Brennraumes so ändert, daß die Porengröße in Flußrichtung des Gas-/Luftgemisch vom Einlaß zum Auslaß zunimmt, wobei sich in einer Zone oder an einer Grenzfläche des porösen Materials im Brennraum für die Porengröße eine kritische Péclet-Zahl für die Flammmentwicklung ergibt, oberhalb der eine Flamme entstehen kann und unterhalb der die Flammmentwicklung unterdrückt ist.

Nach diesem erfindungsgemäßen Vorschlag ist im Gegensatz zum Stand der Technik das Gehäuse mit einem porösen Material gefüllt, das die Eigenschaft besitzt, der Strömung des Gas-/Luftgemisches einen Wi-

derstand entgegenzusetzen, so daß die zur Verbrennung anstehende Gasmenge gedrosselt wird. Außerdem wird auch durch die Wärmekapazität des porösen Materials im Brennraum die Verbrennungswärme besser aufgenommen und kann deshalb günstiger als beim Stand der Technik zur Weiterverwendung übertragen werden. Es entsteht durch das poröse Material zusätzlich eine Kühlung, die die Flammtemperatur verringert.

Bei einer bestimmten Porengröße sind die chemische Reaktion der Flamme und die termische Relaxation gleich groß, so daß unterhalb dieser Porengröße keine Flamme entstehen kann, darüber jedoch eine freie Entflammung stattfindet. Diese Bedingung wird geeigneterweise mit Hilfe der Péclet-Zahl beschrieben, die das Verhältnis von Wärmestrom infolge Transport zu Wärmestrom infolge Leitung angibt. Entsprechend der Porosität, bei der eine Entflammung einsetzen kann, gibt es eine überkritische Péclet-Zahl für die Flammmentwicklung. Da die Flamme nur in dem Bereich mit der kritischen Péclet-Zahl entstehen kann, wird eine selbststabilisierende Flammenfront im porösen Material erzeugt.

Die Verwendung eines porösen Materials im Brennraum bedingt auch eine hohe Wärmekapazität, wodurch eine im porösen Material lokal gespeicherte hohe Wärmeenergie und hohe Effizienzwerte in vorteilhafter Weise erreicht werden können. Weiter hat diese hohe Wärmekapazität auch den Vorteil, daß ein Wärmetauscher beispielsweise zur Erwärmung von Wasser, zur Erzeugung von Heißwasser oder Dampf im Brennraum integriert werden kann, wodurch eine wesentlich bessere Wärmeübertragung für den Wärmetausch erreicht wird als beim Stand der Technik. Die hohe Leistungsdichte ist auf eine höhere Verbrennungsgeschwindigkeit im porösen Medium und eine viel größere Flammenfrontoberfläche, die aufgrund der Porosität entsteht, zurückzuführen.

Das poröse Material hat auch den Vorteil, daß in der Strömung des Gas-/Luftgemisches eine hohe Turbulenz entsteht, wodurch bis zu 50 mal höhere als normale Verbrennungsgeschwindigkeiten erreicht werden können. Damit sind vor allem bessere Verbrennungsgrade verbunden und es werden höhere Leistungsdichten erreicht. An einem weiter unten beschriebenen Ausführungsbeispiel wurden Messungen durchgeführt die zeigen, daß für die Wärmeausnutzung Effizienzen größer als 95% erreicht werden können.

Da das poröse Material selbst die Flamme kühlt, werden entsprechend niedrige Flammtemperaturen in Verbindung mit niedrigen Emissionswerten erreicht. Es ist daher keine Abkühlung nötig, wie sie im Stand der Technik entweder durch Überstöchiometrie oder Abgasrückführung vorgesehen ist.

Da das poröse Material dem Gasfluß selbst einen Widerstand entgegensetzt, arbeitet der erfindungsgemäße Brenner im wesentlichen unter einem weiten Druckbereich. Dadurch ist der Betrieb unter verschiedensten Drücken und sogar unter Hochdruck möglich.

Für den erfindungsgemäßen Brenner ist also ein großer Anwendungsbereich gegeben.

Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung ist die kritische Péclet-Zahl  $65 \pm 25$  und insbesondere für Erdgas/Luftgemische 65.

Diese Zahl wurde aufgrund von Versuchen für verschiedene Gas/Luftgemische ermittelt. Es ergibt sich jedoch eine große Streuung je nach Art des Gases, wobei aber festgestellt wurde, daß bei Erdgas-/Luft-Gemischen unabhängig vom Mischungsverhältnis und von der Zusammensetzung des Erdgases die kritische Péclet-Zahl 65 beträgt. Diese Erkenntnis zeigt, daß die Péclet-Zahl der geeignete Parameter ist, um die Porosität des auszuwählenden Materials bei einem erfindungsgemäßen Brenner zu bestimmen. Die gegebene Lehre erlaubt dem Fachmann, ohne große Vorversuche, einen erfindungsgemäßen Brenner durch die Auslegung der Porosität des porösen Materials auf eine kritische Péclet-Zahl von 65 hinsichtlich der Betriebsart festzulegen.

Ein Brenner gemäß der erfindungsgemäßen Lehre kann einen kontinuierlichen Übergang von einer geringen Porosität zu einer hohen Porosität im Brennraum aufweisen, wobei dann die Flammmentwicklung bei einer Porosität mit der kritischen Péclet-Zahl beginnt. Wie vorstehend schon diskutiert, kann die kritische Péclet-Zahl aber bei verschiedenen Gas/Luftgemischen auch variieren. Das hätte bei kontinuierlichem Verlauf der Porosität des porösen Materials im Mantel den Nachteil, daß sich die Flamme bei unterschiedlichen Bedingungen verschieben könnte. Um eine definierte Position für die Flammmentwicklung zu schaffen, sind bei einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung im Mantel zwei in Flußrichtung des Gas-/Luftgemisches hintereinander liegende Zonen unterschiedlicher Porengröße vorgesehen, wobei die dem Einlaß nachgeordnete erste Zone eine Péclet-Zahl für die Flammmentwicklung hat, die kleiner als die kritische Péclet-Zahl ist, und die vom Einlaß weiter entfernte zweite Zone eine Péclet-Zahl hat, die größer als die kritische Péclet-Zahl ist.

Aufgrund dieser Maßnahmen ist die Flammmentstehung auf die Fläche bzw. den Bereich zwischen den beiden Zonen festgelegt, und zwar im wesentlichen unabhängig von Betriebsparametern, die zu einer Variation der kritischen Péclet-Zahl führen könnten. Die genannte Maßnahme zur Festlegungen des Ortes der Flammmentstehung erhöht also weiter die Stabilität und erlaubt es, einen Brenner zu bauen, der über einen weiten Einsatzbereich verwendbar ist.

Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung ist vorgesehen, daß die erste Zone eine Porengröße aufweist, die eine Péclet-Zahl  $\leq 40$  ergibt, und die zweite Zone eine Porengröße aufweist, die eine Péclet-Zahl  $\geq 90$  ergibt.

Aufgrund dieses Merkmals ist also der gesamte bekannte Variationsbereich von kritischen Péclet-Zahlen, die wie vorstehend schon erwähnt  $65 \pm 25$  betragen können, abgedeckt. Die angegebenen Werte für die Auslegung der Zonen für Péclet-Zahlen  $< 40$  bzw.  $> 90$

sind, wie später an dem Ausführungsbeispiel deutlich wird, einfach zu verwirklichen, und erlauben es, einen Brenner für einen großen Einsatzbereich verschiedenster Gas/Luftgemische auszulegen.

Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung ist das poröse Material ein hitzebeständiger Schaumkunststoff, eine Keramik oder Metall bzw. eine Metalllegierung. Wie derartige poröse Materialien gefertigt werden können, ist aus dem Stand der Technik bekannt.

Die Hitzebeständigkeit muß aber für normale Haushaltsbrenner nicht besonders hoch sein, da die Flamme durch das poröse Material selbst gekühlt wird. Versuche haben gezeigt, daß bei erfindungsgemäßen Brennern mit einer Leistungsfähigkeit von 9KW die Temperaturen unterhalb von 1400° bleiben. Deshalb sieht eine bevorzugte Weiterbildung der Erfindung vor, daß das poröse Material bis 1500°C hitzebeständig ist.

Aufgrund dieses Merkmals stehen für einen erfindungsgemäßen Brenner eine Vielzahl von möglichen Materialien zur Verfügung, so daß die Materialauswahl nicht nur nach technischen Gesichtspunkten getroffen werden kann, sondern ein Brenner auch bezüglich eines kostengünstigen Aufbaus und eines geringen fertigungstechnischen Aufwands optimiert werden kann.

Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung besteht das poröse Material aus Füllkörpern, z.B. in Form von Schüttgut, welches ggfs., beispielsweise durch Sinterung, verfestigt sein kann.

Mit der angegebenen Art von Materialien läßt sich eine Porosität in einfacher Weise erzeugen. Das poröse Material kann aus locker geschichteten Körnern bestehen, es kann aber auch zu einer zusammenhängenden porösen Masse verfestigt sein.

Schüttgut hat vor allem den Vorteil, daß es leicht in das Gehäuse einfüllbar ist und fertigungstechnisch sehr einfach gehandhabt werden kann. Es ist aber auch bei der Brennerwartung, beispielsweise für eine Reinigung, einfach möglich, Schüttgut wieder aus dem Gehäuse zu entfernen.

Gemäß einer vorzugsweisen Weiterbildung der Erfindung enthält das Schüttgut Metall, eine Metalllegierung oder Keramik, insbesondere Steatit, Stomalox oder  $Al_2O_3$ . Diese Materialien entsprechen in jeder Hinsicht den technischen Anforderungen für einen erfindungsgemäßen Brenner. Das genannte Schüttgut ist leicht erhältlich und liegt auch preislich in einem vertretbaren Bereich. Durch die Weiterbildung wird so ein kostengünstiger und fertigungstechnisch einfacher Aufbau eines erfindungsgemäßen Brenners ermöglicht.

Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung besteht das Schüttgut in der Nähe des Auslasses aus Körnern kugelförmiger Form mit mittleren Durchmessern von 5mm und im nachfolgenden Bereich mit mittleren Durchmessern > 11mm, wenn der Durchmesser zur Erreichung der kritischen Péclet-Zahl zwischen 5 und 11mm liegt und insbesondere 9mm beträgt.

Wenn die Körner des Schüttgutes kugelförmig sind, läßt sich bei der Fertigung die Gleichmäßigkeit des Schütt-

gutes leicht kontrollieren. Insbesondere gilt das auch für die erreichbare Porosität, die dann nur durch den Durchmesser der kugelförmigen Körner und deren Anordnung in der Schüttung bestimmt ist. Es hat sich bei Stahl, Steatit, Stomalox oder  $Al_2O_3$  und bei Verwendung von Erdgas/Luftgemischen gezeigt, daß die Péclet-Zahl von 65 bei Kugeln mit einem Durchmesser von 9mm und Péclet-Zahlen von 40 bzw. 90 bei Durchmessern von ungefähr 11 bzw. 5mm erreicht werden. Bei der Weiterbildung wird also die erforderliche Porosität mit einfachen Mitteln erzielt, vor allem da Schüttgut der genannten Art und der entsprechenden Größe leicht verfügbar ist. Ohne großen Aufwand zu treiben, lassen sich so die erforderlichen Porositäten für einen erfindungsgemäßen Brenner verwirklichen.

Wie beim Stand der Technik schon erwähnt wurde, läßt sich vor allem die  $NO_x$  und CO-Emission durch Einsatz von Katalysatormaterialien verringern. Deswegen ist gemäß einer bevorzugten Weiterbildung vorgesehen, daß die Innenflächen der Hohlräume des porösen Materials bzw. die Oberflächen der Körner des Schüttguts mit einem Katalysatormaterial beschichtet sind.

Bei einem erfindungsgemäßen Brenner ist aufgrund der Porosität eine große Oberfläche zur Wechselwirkung mit dem Gas vorhanden. Dadurch ist zu erwarten, daß ein Katalysator wesentlich effektiver wirkt, als bei den aus dem Stand der Technik bekannten Konfigurationen. Außerdem läßt sich ein erfindungsgemäßer Brenner gemäß der Weiterbildung mit Katalysatoren wesentlich einfacher ausstatten, wodurch sehr schnell ein fertigungsreifer, serienmäßig verfügbarer Katalysatorbrenner möglich gemacht wird.

Gemäß einer vorzugsweisen Weiterbildung der Erfindung weist das Gehäuse zumindest teilweise eine Kühlvorrichtung auf.

Im Prinzip könnte man die Wärme, die in das Gehäuse abfließt, auch mit Isoliermaterial gegenüber der Außenwelt abschirmen, jedoch hat eine Kühlung den Vorteil, daß die Wärme von dem Kühlmittel aufgenommen und dann weiterverwendet werden kann. Aufgrund dessen kann die Effizienz eines erfindungsgemäßen Brenners weiter erhöht werden.

Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung ist die Kühlvorrichtung als eine das Gehäuse umgebende bzw. dieses bildende Kühlschlange ausgebildet, durch die ein Kühlmittel, insbesondere Wasser, fließt. Weiter kann eine Überwachungseinrichtung vorgesehen sein, die bei Ausfall des Kühlmittels die Zufuhr von Brennstoff in den Brennraum verhindert.

Aufgrund dieser Merkmale ist die in der Kühlung aufgenommene Wärme weiterverwendbar, da das fließende Kühlmittel Wärme transportiert, die an einem anderen Ort entnommen werden kann. Bei Kühlmittelströmen kann aber nicht ausgeschlossen werden, daß der Strom des Kühlmittels durch Leitungsbruch oder Verstopfung der Kühlschlange unterbrochen wird, wodurch sich die Außenwand des Brenners aufheizen könnte, was zu Brand oder Verbrennungen führen kann. Deswegen ist

es zweckmäßig, eine Überwachungseinrichtung vorzusehen, die bei Ausfall des Kühlmittels die Zufuhr von Brennstoff in den Brennraum verhindert.

Aufgrund der Maßnahmen läßt sich also eine hohe Effizienz des Brenners bei gleichzeitiger Kühlung der Außenwand erzeugen, wobei eine große Sicherheit gewährleistet ist.

Gemäß einer vorzugsweisen Weiterbildung der Erfindung ist in einem Bereich größerer Porenöffnungen des Materials eine Kühlvorrichtung zum Wärmetauschen vorgesehen. Mit Hilfe dieser Kühlvorrichtung, die als Kühlschlange ausgebildet sein kann, wird die Wärme im Brenner z.B. als Heißwasser oder Dampf abgeführt und kann in weiteren Prozessen zur Heizung oder zum Betrieb von Turbinen weiterverwendet werden. Im Gegensatz zum Stand der Technik erfolgt die Wärmeübertragung hier nicht nur durch direkte Wechselwirkung des heißen Gases mit der Kühlvorrichtung, sondern zum größten Teil über das poröse Material, wodurch eine bessere Wärmeübertragung als beim Stand der Technik gewährleistet ist. Auch dieses Merkmal dient zur Erhöhung der Effizienz.

Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung ist eine Kühlung des Gehäuses vorgesehen, die mit der Kühlvorrichtung zum Wärmetauschen in Reihe geschaltet ist.

Aufgrund dieser Maßnahme wird die Energie, die durch die Kühlung des Gehäuses im Kühlmittel aufgenommen wird, in denselben Kreis geführt, in dem die Wärme in dem Kühlmittel zum Wärmetauschen verwendet wird. Vorzugsweise wird das Kühlmittel dabei erst zur Kühlung des Gehäuses verwendet und anschließend in den Innenraum des Brenners geleitet, wo es mit dem porösen Material hoher Temperatur wechselwirkt. Bei der Weiterbildung wird so die gesamte vom Brenner erzeugte Wärme im Kühlmittel aufgenommen, wodurch die Effizienz weiter erhöht wird.

Je effektiver der Übergang der im Brenner erzeugten Wärme auf die Kühlvorrichtung innerhalb des Brenners ist, desto wirkungsvoller erfolgt die Wärmeübertragung. Außerdem bildet die Kühlvorrichtung im Brenner einen weiteren Strömungswiderstand, der bei der Auslegung des porösen Materials im Bereich der Kühlvorrichtung berücksichtigt werden kann. Die Kühlvorrichtung wirkt dann also ähnlich wie das poröse Material. Die Menge porösen Materials kann dann verringert werden, wobei auch eine wirkungsvollere Wärmeübertragung erreicht wird, wenn die Kühlvorrichtung gemäß einer Weiterbildung selbst so ausgebildet ist, daß diese zumindest teilweise als poröses Material wirkt und/oder poröses Material ersetzt.

Bei der Optimierung eines Brenners sollte auch der Abstand der Kühlvorrichtung von der Flamme möglichst günstig gewählt werden. Die höchste Temperatur erreicht man zwar in der Nähe der Flamme, es können jedoch auch für geringere Temperaturen geeignete Materialien zur Ausbildung der Kühlvorrichtung ausgewählt werden, wenn diese sich außerhalb des Flammbereichs

befindet. Außerdem wird die Flamme durch die Kühlvorrichtung nicht zusätzlich gekühlt, wenn diese außerhalb des Flammbereichs liegt, was die Stabilität der Flamme zusätzlich erhöht. Deswegen sieht eine vorzugsweise Weiterbildung der Erfindung vor, daß der Abstand der Kühlvorrichtung von dem Bereich mit der kritischen Péclet-Zahl mindestens so groß ist, daß die Kühlvorrichtung mit der Flamme nicht in Berührung steht. Auf die Wärmeübertragung von Flamme zur Kühlvorrichtung hat das aufgrund der guten Wärmeleitung im porösen Material nur wenig Einfluß.

Um die Flamme durch die Kühlung des äußeren Gehäuses nicht zu beeinflussen, sieht eine vorzugsweise Weiterbildung der Erfindung vor, daß durch eine zusätzliche Vorrichtung, z.B. einen Einsatz im Brenneraum ein Span mit einer Abmessung größer als 1mm zwischen der Innenwand des Gehäuses und dem Einsatz, in dem sich das poröse Material befindet, entsteht. Dadurch werden die CO-Emissionen, die durch unvollständige oder instabile Verbrennungen entstehen, weiter unterdrückt.

Versuche an Ausführungsbeispielen haben gezeigt, daß die höchste Effektivität dann erreicht wird, wenn die Porosität mit Schüttgut erzeugt wird und die Kühlvorrichtung in einem Abstand von 2 bis 4 Korngrößen der Schüttung von dem Grenzbereich mit der kritischen Péclet-Zahl 65 angeordnet ist. Allgemein ist gemäß einer Weiterbildung zu erwarten, daß sich die günstigen Bedingungen dann ergeben, wenn die Kühlvorrichtung von der Zone mit der für die kritische Péclet-Zahl erforderlichen Porosität soweit entfernt ist, daß sie nicht in den Flammenbereich eintaucht.

Gemäß einer anderen bevorzugten Weiterbildung ist am Brenner eine Zündvorrichtung so angeordnet, daß die Entflammung des Gas-/Luftgemisches in einem Bereich mit einer Porosität erfolgt, die die kritische Péclet-Zahl aufweist.

Im Prinzip könnte das Gas-/Luftgemisch an allen Stellen des Brenners entzündet werden, an denen ein brennfähiges Gas-/Luftgemisch vorhanden ist, beispielsweise vom Auslaß her. Gemäß der Weiterbildung erfolgt die Zündung aber in einem Bereich, in dem die Porosität die kritische Péclet-Zahl aufweist. Dadurch wird die Flamme genau in dem Bereich gezündet, indem sie auch im stabilen Zustand brennt. Aufgrund dessen wird eine hohe Stabilität schon im Zeitpunkt der Entflammung bewirkt, da an anderen Stellen erst ein Rückschlagen der Flamme erfolgen müßte, das jedoch bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Brennstoffes gar nicht möglich ist. In diesem Fall könnte eine Zündung nur bei zwischenzeitlicher Reduzierung des Brennstoffflusses erfolgen. Das Merkmal der Weiterbildung reduziert also den apparativen Aufwand für einen erfindungsgemäßen Brenner in hohem Maß, da eine Regelung des Zündvorganges unterbleiben kann.

Gemäß einer anderen vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung ist zwischen Einlaß und porösem Material eine Flammenfalle angeordnet.

Aufgrund des porösen Materials ist zwar kein Rückschlagen der Flamme zu erwarten, da die Peclet-Zahl im Einlaßbereich keine Ausbildung einer Flamme erlaubt. Dennoch ist vor allem aus Sicherheitsgründen eine Flammenfalle vorgesehen, die beispielsweise dann wichtig sein kann, wenn nach Reinigungsarbeiten das die hohe Porosität aufweisende Schüttgut versehentlich in den Einlaßbereich eingefüllt worden ist.

Die Flammenfalle sollte, da sie im Normalfall nicht benötigt wird, möglichst einfach ausgebildet sein. Gemäß einer vorzugsweisen Weiterbildung ist die Flammenfalle eine Platte, die eine Vielzahl von Löchern mit einem Durchmesser kleiner als der für die jeweiligen Brennstoffe kritische "quenching" Durchmesser aufweist. Es hat sich gezeigt, daß diese Flammenfalle bei Erdgas/Luftgemischen wirksam ist. Ihr großer Vorteil liegt vor allem in der Einfachheit der Herstellung und in der sehr kostengünstigen Ausführung. Der Aufwand für die Flammenfalle wird daher gering gehalten und bleibt vertretbar, so daß eine zusätzliche Flammenfalle wirtschaftlich vertretbar eingesetzt werden kann, obwohl sie im Normalfall für den erfindungsgemäßen Brenner nicht notwendig ist.

Aufgrund der hohen Leistungsdichte und der großen Menge Materials zur Aufnahme von Wärme ist es auch einfach, den erfindungsgemäßen Brenner nach Art eines Brennwertkessels zu betreiben, da die Abgas-temperatur bei diesen stark reduziert ist. Das dabei jedoch entstehende Kondensat muß abgeführt werden. Dies ist bei dem erfindungsgemäßen Brenner einfach zu bewerkstelligen, denn es wurden bei Versuchsmodellen festgestellt, daß diese in jeder Lage, sogar mit Flammentwicklung entgegen der Schwerkraft, betrieben werden können. Bei einem mit dem Auslaß nach unten angeordneten Brenner würde das Kondensat in einfacher Weise durch diesen abfließen können, so daß keine zusätzlichen Maßnahmen getroffen werden müssen. Deshalb sieht eine bevorzugte Weiterbildung der Erfindung vor, daß Einlaß, Auslaß und poröses Material so angeordnet sind, daß entstehendes Kondensat durch den Auslaß abfließen kann.

Weitere Maßnahmen und Vorteile der Erfindung ergeben sich auch aus den nachfolgend anhand der Zeichnungen beschriebenen Ausführungsbeispielen.

Es zeigen:

Fig. 1 eine erste Ausführungsform des Brenners mit drei Zonen;

Fig. 2 eine weitere Ausführungsform des Brenners mit zwei Zonen;

Fig. 3 ein Diagramm für Peclet-Zahlen in Abhängigkeit des Kugeldurchmessers bei einer Kugelschüttung,

Fig. 4 ein Diagramm für den Temperaturverlauf innerhalb des porösen Materials bei dem Ausfüh-

rungsbeispiel gemäß Fig. 2,

Fig. 5 einen Schnitt durch einen als Wassererhitzer oder Dampferzeuger ausgelegten Brenner entsprechend der in Fig. 2 gezeigten, jedoch mit dem Auslaß nach unten angeordneten Ausführungsform und

Fig. 6 einen Schnitt durch einen mit einem Einsatz versehenen Brenner.

Die Flammentwicklung in porösem Material ist bereits durch mehrere Wissenschaftler untersucht und beschrieben worden, insbesondere durch V.S. Babkin, A. A. Korzhavin und V.A. Bunev in "Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media, Combustion and Flame", Volume 87, 1991, S. 182 bis 190. Von diesen Autoren wurde der folgende Ausbreitungsmechanismus für Flammen beschrieben.

Im porösen Material werden Turbulenzen im Brennstofffluß erzeugt. Eine positive Rückkopplung zwischen Flammenbeschleunigung und der Erzeugung von Turbulenzen wird durch lokale Unterdrückung von den chemischen Reaktionen aufgrund intensiven Wärmeaustauschs in der turbulenten Flammenzone gedämpft. Wenn die charakteristische Zeit des thermischen Ausgleichs kleiner wird als die chemische Konversion, wird die Flambildung verhindert. Da außerdem bei turbulenter Strömung die verschiedensten Geschwindigkeiten auftreten, werden die Anteile der Flamme mit maximalen Geschwindigkeiten unterdrückt, wodurch eine stabile Flammenausbreitung erzeugt wird.

Die Experimente der Autoren führten zu einer kritischen Peclet-Zahl von  $65 \pm 25$  für die Flammenfortpflanzung in porösem Material, wobei die Varianz im wesentlichen durch extrem unterschiedliche Gaszusammensetzungen gegeben ist. Bei Erdgas/Luftgemischen ist aber im wesentlichen eine Peclet-Zahl von 65 zu erwarten.

Die Peclet-Zahl läßt sich durch die folgende Gleichung errechnen:

$$P_e = (S_L d_m c_p \rho) / \lambda.$$

wobei  $S_L$  die laminare Flammengeschwindigkeit,  $d_m$  der äquivalente Durchmesser für den mittleren Hohlraum des porösen Materials,  $c_p$  die spezifische Wärme des Gasgemisches,  $\rho$  die Dichte des Gasgemisches  $\lambda$  und die Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches ist. Die Gleichung zeigt, daß die Bedingungen für die Flammentwicklung im wesentlichen von Gasparametern abhängen, und die Eigenschaften des porösen Materials nur über  $d_m$  in die Gleichung eingehen. Die Peclet-Zahl ist also im wesentlichen unabhängig von den Materialeigenschaften und nur abhängig von der Porosität. Es können also bei erfindungsgemäßen Brennern die verschiedensten Materialien bzw. geometrische Formen

als poröses Material verwendet werden.

Im übrigen sind alle in die Gleichung eingehenden Werte meßbar, so daß mit Hilfe der angegebenen Gleichung eine technische Lehre gegeben ist, die sich auf die verschiedensten Gasgemische anwenden läßt.

Fig. 1 zeigt in schematischer Darstellung einen Brenner mit einem Gehäuse 1, welches einen Einlaß 2 für das Gas-/Luftgemisch und einen Auslaß 3 für die Abgase aufweist. In einem Abstand vom Einlaß 2 ist eine Flammenfalle 4 vorgesehen, welche den Innenraum des Gehäuses 1 unterteilt. Der zwischen dieser Flammenfalle 4 und dem Auslaß 3 gelegene Teil des Innenraumes des Gehäuses 1 ist mit einem porösen Material 5 ausgefüllt. Weiter ist eine Zündvorrichtung 6 zur Zündung des Gasgemisches vorgesehen.

Das Gas-/Luftgemisch tritt durch den Einlaß 2 ein und die Abgase verlassen den Brenner durch den Auslaß 3. Das poröse Material 5 weist örtlich unterschiedliche Porositäten auf, und zwar entsprechend den unterschiedlich schraffierten Zonen A, B und C. In Zone A sind die Poren so klein, daß die sich daraus ergebende Péclet-Zahl kleiner als die kritische Péclet-Zahl (65 für Erdgas/Luftgemische) ist. Die kritische Péclet-Zahl ist der Grenzwert, oberhalb dem eine Flamme entstehen kann bzw. unterhalb dem eine Flamme unterdrückt wird. In Zone C ist die Péclet-Zahl wesentlich größer als die kritische Péclet-Zahl, so daß sich dort eine Flamme entwickeln kann. Zone B stellt einen Übergangsbereich dar, innerhalb dem die Porosität die kritische Péclet-Zahl erreicht.

Nach den dargestellten Erkenntnissen über die Flammentwicklung im porösen Material, kann die Flamme nur in Zone B entstehen, und zwar nur an den Stellen, an denen die Porosität die kritische Péclet-Zahl erreicht. Das poröse Material kühlt dabei die Flamme, so daß nur wenig  $\text{NO}_x$  erzeugt wird. Die Innenflächen der Hohlräume des porösen Materials, insbesondere des der Zone B, können auch mit einem Katalysator beschichtet werden, wodurch eine weitere Verringerung des  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}$ -Anteils im Abgas erreicht wird.

Aufgrund der oben dargestellten physikalischen Gesetzmäßigkeiten für die Flammentwicklung in porösem Material wird sich die Flamme in der Zone B stabilisieren, und zwar an Orten, an denen das Gas-/Luftgemisch gerade die kritische Péclet-Zahl erreicht. Dies bedeutet aber auch, daß sich die Flammenansätze bei starken Änderungen der physikalischen Parameter innerhalb der Region B verschieben können, so daß eine örtliche Flammenstabilität prinzipiell nicht gegeben ist. Andererseits hat die durch die Zone B gegebene Übergangsschicht den Vorteil, daß sich die Flammenfront bei den kleinstmöglichen Hohlräumen stabilisiert, wodurch der bestmögliche Wärmeübergang von der Flamme zum porösen Material gewährleistet ist.

Wird jedoch auf eine örtlich stabile Flamme Wert gelegt, kann ein Brenner nach dem in Fig. 2 gezeigten Ausführungsbeispiel verwendet werden. Bei diesem ist gegenüber dem in Fig. 1 beschriebenen die Zone B

weggelassen worden, so daß nur die zwei Zonen A und C vorhanden sind. Hier stabilisiert sich die Flamme aufgrund der oben dargestellten Gesetzmäßigkeiten an der Grenzschicht zwischen Zone A und Zone C. Die Flamme ist also durch die Grenzfläche festgelegt und daher ortsstabil. Aufgrund der Varianz von  $\pm 25$  der angegebenen Péclet-Zahl von 65 ist es vorteilhaft, in Zone A eine Porosität vorzusehen, deren Péclet-Zahl kleiner als 40 ist und in Zone C eine Porosität, die einer Péclet-Zahl von größer 90 entspricht. Dann bestimmt die Grenzschicht für einen großen Bereich von Gas-/Luftgemischen den Ort der Flammentwicklung, wodurch die Stabilität für einen großen Bereich von Gasparametern gewährleistet wird.

Für das poröse Material können unterschiedliche Materialien, z.B. Keramikwerkstoffe, verwendet werden. Es sind aber auch hitzebeständige Schaumkunststoffe möglich. Bei den folgenden Betrachtungen wird als poröses Material Schüttgut verwendet. Bei Schüttgut mit runden Körnern läßt sich der in die Gleichung für die Péclet-Zahl eingehende Parameter  $d_m$  für die Porosität aufgrund von geometrischen Überlegungen berechnen als  $d_m = \delta/2,77$ , wobei  $\delta$  der Durchmesser der kugelförmigen Körner des Schüttguts ist.

Entsprechend der oben angegebenen Gleichung wurden für Erdgas/Luftgemisch Péclet-Zahlen in Abhängigkeit vom Durchmesser  $\delta$  berechnet, die in Fig. 3 dargestellt sind. Für die Berechnung wurde eine stöchiometrische laminare Flammengeschwindigkeit  $S_L$  von 0,4 mm pro sec angenommen. Die Péclet-Zahl von 65 wird bei einem Kugelradius von 9 mm erreicht, während die genannten Péclet-Zahlen von 40 bzw. 90 bei 6 mm bzw. bei 12,5 mm gegeben sind.

In einem Versuchsaufbau gemäß Fig. 2 wurden Körner mit Durchmessern von 5 mm in Zone A und 11 mm in Zone C verwendet. Dabei wurden unterschiedlichste Testmaterialien verwendet, z.B. Kugeln aus poliertem Stahl sowie Keramikkörner unterschiedlichster Zusammensetzungen und Größen, wie Steatit, Stema-lox oder  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Es zeigte sich, daß die erfindungsgemäßen Vorteile bei allen Materialien erreicht wurden.

Der Temperaturverlauf in Flußrichtung des Gas-/Luftgemisches in einem derartigen Versuchsbrenner ist in Fig. 4 für verschiedene Leistungen dargestellt, wobei der Mantel von außen gekühlt wurde. Es zeigte sich, daß selbst bei hohen Leistungen von 9 kW die höchste Temperatur unter  $1500^\circ\text{C}$  lag. Deshalb können alle Materialien verwendet werden, die bis  $1500^\circ\text{C}$  temperaturstabil sind.

In Fig. 4 ist eine erste senkrechte Linie eingezeichnet, die die Grenzfläche zwischen der Zone A und der Zone C darstellt. Es ist deutlich erkennbar, daß die höchste Temperatur an der Grenzfläche bzw. bezüglich kurz hinter der Grenzfläche in der Zone C entsteht.

Weiter ist aus Fig. 4 erkennbar, daß die Temperaturen zum Auslaß 3 (zweite senkrechte Linie) hin stark abfallen. Es kann also mit Hilfe eines erfindungsgemäßen Brenners eine Abgastemperatur unterhalb des Tau-



punkts erreicht werden, wodurch sich die Vorteile eines Brennwertkessels ergeben. Allerdings muß aber das dabei entstehende Kondensat abgeführt werden. Es hat sich gezeigt, daß der Brenner unabhängig von seiner Lage zum Schwerfeld der Erde stabil arbeitet, so daß er auch waagrecht oder mit dem Auslaß 3 nach unten betrieben werden kann. Bei dieser letzten Anordnung kann das Kondensat aus dem Brenner herausfließen.

Die niedrige Gastemperatur am Auslaß zeigt auch, daß die Wärme des verbrannten Gas/Luftgemisch fast vollständig von dem porösen Material aufgenommen wird, wodurch der Bau eines Wärmetauschers mit großer Effizienz ermöglicht wird. Mit einem Brenner nach dem Ausführungsbeispiel von Fig. 2 ist es möglich, einen Wassererhitzer mit einer Leistung von 5kW eine Abgastemperatur von 60°C und einem Wirkungsgrad von 95% zu bauen. Die baulichen Abmessungen des Brenners konnten dabei sehr klein gehalten werden, so betrug die Länge des Brenners nur 15cm und der Durchmesser 8cm. Die geringen Abmessungen sind vor allem auf die hohe Leistungsdichte zurückzuführen, die mit Hilfe von porösem Material erreicht werden kann.

Fig. 4 zeigt auch, daß die höchsten Temperaturen kurz hinter der Grenzfläche zwischen Zone A und Zone C entstehen. Hieraus folgt, daß für die Erzeugung heißen Dampfes die Wärmeübertragung von der Flamme auf das zu erheizende Wasser in der Nähe dieser Grenzfläche stattfinden sollte. Eine das zur Dampferzeugung vorgesehene Wasser führende Kühlvorrichtung sollte daher in dem Bereich des porösen Materials verlaufen, der ungefähr 3cm von der Grenzfläche entfernt ist.

Unabhängig hiervon ist es im allgemeinen zweckmäßig, die Kühlvorrichtung nicht zu nah an der Flamme anzuordnen, da die Flamme zur Erhaltung ihrer Stabilität nicht selbst abgekühlt werden soll. Deswegen ist es vorteilhaft, die Kühlvorrichtung in die Nähe der Grenzschicht zu verlegen, aber nicht in den Flammbereich. Sollten Materialprobleme aufgrund der hohen Temperaturen bei der Ausführung der Kühlvorrichtung entstehen, sind größere Abstände vorzuziehen.

Fig. 5 zeigt den schematischen Aufbau eines zum Erhitzen von Wasser bzw. zum Erzeugen von Dampf geeigneten Brenners. Dieser umfaßt im wesentlichen wieder das Gehäuse 1, den Einlaß 2, den Auslaß 3, die Flammenfalle 4, die Zündeinrichtung 6 und das poröse Material 5. Der Brenner ist mit seinem Auslaß 3 nach unten angeordnet, so daß Kondensat leicht abfließen kann. Das poröse Material 5 ist nur schematisch durch gleichgroße Kugeln angedeutet. Dies entspricht nicht den realen Gegebenheiten, denn die Porosität des porösen Materials ändert sich ja entlang der Flußrichtung des Gas/Luftgemisch, wobei die Kugeln im Einlaßbereich einen geringeren Durchmesser als im Auslaßbereich aufweisen.

Die Grenzfläche zwischen den oben beschriebenen Zonen A und C ist durch eine unterbrochene Linie 7 angedeutet. Wie vorstehend schon erläutert, entsteht die Flamme an dieser Grenzfläche 7 und überträgt ihre

Wärme im wesentlichen in einem Bereich von wenigen cm in der Region C auf das poröse Material.

Zusätzlich ist eine das Gehäuse 1 umgehende bzw. dieses sogar bildende äußere Kühlvorrichtung 8 vorgesehen, die als um das Gehäuse 1 angeordnete Kühlschlange ausgebildet sein kann und die Wärmeabfuhr nach außen verhindert. Die Kühlschlange wird von Wasser durchflossen und ist mit einem Wasserwächter versehen, der bei Ausfall von Kühlmittel den Zustrom des Gas-/Luftgemisch in den Einlaß 2 unterbricht, so daß das Gehäuse 1 stets gekühlt wird, wenn der Brenner in Betrieb ist. So wird sichergestellt, daß sich die Außenwand nicht zu stark erwärmen kann, wodurch wiederum verhindert wird, daß man sich am Gehäuse verbrennen kann oder von diesem ein Brand ausgelöst wird. Die von der Gehäusewand durch die Kühlschlange abgeführte Wärme kann weiterverwendet werden, dadurch erhöht sich die Effizienz bei der Heißwasser- oder Dampferzeugung.

Weiter zeigt Fig. 5 die Anordnung einer inneren Kühlvorrichtung 9, die sich vom Auslaß 3 her bis kurz vor die Grenzfläche 7 in das poröse Material der Zone C erstreckt.

Die innere Kühlvorrichtung 9 ist nur schematisch angedeutet, in der Praxis kann sie z.B. die Form einer Spirale aufweisen, damit ein möglichst guter Wärmeübergang vom porösen Material 5 gewährleistet ist. Es sind aber auch kompliziertere Ausführungsformen für die Kühlvorrichtung 9 denkbar. So kann diese beispielsweise selbst das poröse Material bilden bzw. zur Porosität beitragen, wodurch ein noch besserer Wärmeübergang möglich wird.

Die äußere Kühlvorrichtung 8 ist mit der inneren Kühlvorrichtung 9 in Reihe verbunden, wodurch das schon durch das Gehäuse 1 vorgewärmte Wasser in die innere Kühlvorrichtung 9 geführt wird und zur Erhitzung des Wassers bzw. für die Erzeugung von Dampf mitverwendet wird.

Um zu vermeiden, daß die Flamme im Brennraum nicht durch zu starke Abkühlung durch die äußere Kühlvorrichtung 8 beeinflusst wird, ist, wie aus Fig. 6 ersichtlich, im Flammbereich des Brennraumes ein Einsatz 10, der aus einem geeigneten Material besteht, vorgesehen, der das poröse Material 5 aufnimmt und die Innenwand des Gehäuses 1 gegen direkte Wärmebestrahlung abschirmt. Der Einsatz 10 kann auch so ausgebildet sein, daß er in einem Abstand von der Innenwand des Gehäuses 1 angeordnet ist, so daß sich zwischen der Innenwand und dem Einsatz 10 ein Spalt 11 bildet, der frei von dem brennbaren Gas-/Luftgemisch ist. Durch diese Ausbildung des Brennraumes im Flammbereich werden die CO-Emissionen, die durch unvollständige oder instabile Verbrennung entstehen, weiter unterdrückt.

Die Flammenfalle 4 soll ein Rückschlagen der Flamme verhindern. Grundsätzlich ist sie bei dem erfindungsgemäßen Brenner nicht notwendig, da die Flamme wegen der geringen Péclet-Zahl in der Zone A nicht



zum Einlaß 2 durchschlagen kann, sie ist also lediglich zur Erhöhung der Sicherheit vorgesehen. Die Flammentalle besteht im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 5 aus einem 4mm dicken Stahlblech, in das eine Vielzahl von Löchern mit einem Durchmesser von 1 mm gebohrt wurde, wobei die Dichte der Löcher kleiner als 20/cm<sup>2</sup> ist.

Die Zündeinrichtung 6 befindet sich in der Nähe der Grenzfläche 7, um eine besonders wirkungsvolle Zündung zu ermöglichen. Im Ausführungsbeispiel brennt die Flamme selbststabilisierend an der Grenzfläche 7.

Es wurden auch Versuche mit einer Zündung vom Auslaß 3 her durchgeführt. Diese Art der Zündung war jedoch nachteilig, da die Geschwindigkeit der Flammfront der freien Flamme vergleichsweise gering zu der Flammengeschwindigkeit im porösen Material ist. Ein Rückschlagen der Flamme vom Auslaß 3 zur Grenzfläche 7 war nur möglich, wenn die mittlere Geschwindigkeit des Gas-/Luftgemisches am Auslaß 3 gering gehalten wurde. Eine Zündung vom Auslaß 3 her würde also eine zusätzliche Regelung erfordern, bei der die Strömungsgeschwindigkeit des Gas-/Luftgemisches erst gedrosselt und dann nach Entflammung an der Grenzfläche 7 wieder erhöht wird. Hieraus ergibt sich der Vorteil einer Zündung in Nähe der Grenzfläche 7, die komplizierte Regelungs-Lösungen für das Gas-/Luftgemisch nicht erfordert.

Die vorbeschriebenen Ausführungsbeispiele zeigen den einfachen Aufbau des erfindungsgemäßen Brenners bei geringer Temperatur, guter Wärmeübertragung sowie einer stabilen Flamme. Bei unvollständiger Verbrennung ist es bei den erfindungsgemäßen Brennern auch möglich, diese überstöchiometrisch zu betreiben oder durch das Vorsehen von Katalysatormaterial in dem porösen Material eine bessere Verbrennung durchzuführen, wobei der Schadstoffanteil im Abgas noch weiter reduziert wird.

## Patentansprüche

1. Brenner, der für ein Gas-/Luftgemisch als Brennstoff ausgelegt ist, das aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften und die Auslegung des Brenners eine laminare Flammengeschwindigkeit  $S_L$  aufweist und bezüglich seiner spezifischen Wärme  $c_p$ , einer Dichte  $\rho$  sowie einer Wärmeleitzahl  $\lambda$  bestimmt ist, wobei bei diesem Brenner ein Gehäuse (1) vorgesehen ist, das einen Brennraum mit einem Einlaß (2) für das Gas-/Luftgemisch und einen Auslaß (3) für das Abgas aufweist, bei dem das Gehäuse (1) ein poröses Material (5) mit zusammenhängenden Hohlräumen enthält, dessen Porosität sich längs des Brennraumes ändert, dadurch gekennzeichnet, daß die Porengröße in Flußrichtung des Gas-/Luftgemisches vom Einlaß (2) zum Auslaß (3) zunimmt, wobei sich in einer Zone (B) oder an einer Grenzfläche (7) des porösen Materials (5) im Brennraum für die Porengröße eine kritische Péclet-Zahl ( $S_L d_m c_p \rho$ )/ $\lambda$  aufgrund der ausgewählten Porengröße für die Flammentwicklung des Gas-/Luftgemisches ergibt, oberhalb der eine Flamme entstehen kann und unterhalb der die Flammentwicklung unterdrückt ist, wobei  $d_m$  den äquivalenten Durchmesser für den mittleren Hohlraum des porösen Materials in der Zone (B) bzw an der grenzfläche (7) bezeichnet wobei die Flammmentstehung auf der Fläche (7) bzw. in dem Zone (B) im wesentlichen unabhängig von Betriebsparametern die zu einer Variation der kritischen Péclet-Zahl führen könnten, festgelegt ist.
2. Brenner nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die kritische Péclet-Zahl  $65 \pm 25$  und insbesondere für Erdgas/Luftgemische 65 beträgt.
3. Brenner nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß im Gehäuse (1) zwei in Flußrichtung des Gas-/Luftgemisches hintereinander liegende erste und zweite Zonen (A, C) unterschiedlicher Porengröße vorgesehen sind zwischen denen sich die grenzfläche (7) sich befindet, wobei die dem Einlaß (2) nachgeordnete erste Zone (A) eine Péclet-Zahl aufweist, die kleiner als die kritische Péclet-Zahl ist, und die vom Einlaß (2) weiter entfernte zweite Zone (C) eine Péclet-Zahl aufweist die größer als die kritische Péclet-Zahl ist.
4. Brenner nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Zone (A) eine Porengröße aufweist, die eine Péclet-Zahl  $\leq 40$  ergibt, und die zweite Zone (C) eine Porengröße aufweist, die eine Péclet-Zahl  $\geq 90$  ergibt.
5. Brenner nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das poröse Material hitzebeständiger Schwammkunststoff, Keramik oder Metall bzw. eine Metalllegierung ist.
6. Brenner nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das poröse Material bis zu einer Temperatur von 1500°C hitzebeständig ist.
7. Brenner nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das poröse Material Füllkörper sind, z.B. in Form von Schüttgut, welche gegebenenfalls, beispielsweise durch Sinterung, verfestigt sein kann.
8. Brenner nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Schüttgut Metall oder Keramik, insbesondere Steatit, Stomalox oder  $Al_2O_3$  enthält.
9. Brenner nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Schüttgut in der Nähe des Einlasses (2) aus Körnern kugelförmiger Form mit mittleren Durchmessern von 5mm und im nachfol-

genden Bereich mit mittleren Durchmesser  $\geq 11\text{mm}$  besteht, wenn bei atmosphärischem Druck der Durchmesser zur Erreichung der kritischen Péclet-Zahl zwischen 5 und 11mm liegt und insbesondere 9mm beträgt.

10. Brenner nach Anspruch 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Innenflächen der Hohlräume des porösen Materials bzw. die Oberflächen der Körner des Schüttguts mit einem Katalysatormaterial beschichtet sind.
11. Brenner nach Anspruch 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Gehäuse (1) zumindest teilweise eine Kühlvorrichtung (8) aufweist.
12. Brenner nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Kühlvorrichtung (8) als eine das Gehäuse (1) umgebende bzw. dieses bildende Kühlschlange ausgebildet ist, durch welche ein Kühlmittel, insbesondere Wasser, fließt.
13. Brenner nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß eine Überwachungseinrichtung vorgesehen ist, die bei Ausfall des Kühlmittels die Zufuhr von Brennstoff in den Brennraum blockiert.
14. Brenner nach Anspruch 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß in einem Bereich größerer Porenöffnungen des Materials, eine Kühlvorrichtung (9) zum Wärmetauschen angeordnet ist.
15. Brenner nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Kühlvorrichtung (8) des Gehäuses (1) mit der Kühlvorrichtung (9) zum Wärmetauschen in Reihe geschaltet ist.
16. Brenner nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Kühlvorrichtung (9) selbst so ausgebildet ist, daß diese zumindest teilweise als poröses Material wirkt und/oder poröses Material ersetzt.
17. Brenner nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand der Kühlvorrichtung (9) von der Zone (B) oder der Grenzfläche (7) mit der kritischen Péclet-Zahl mindestens so groß ist, daß die Kühlvorrichtung (9) mit der Flamme nicht in Berührung kommt.
18. Brenner nach Anspruch 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Innenwand des Gehäuses (1) mindestens im Flambereich durch eine zusätzliche Vorrichtung (10), beispielsweise durch einen Einsatz aus geeignetem Material, gegen direkte Wärmebestrahlung abgeschirmt ist.
19. Brenner nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet,

net, daß die Vorrichtung (10) in einem einen Spalt (11) freilassenden Abstand von der Innenwand des Gehäuses (1) angeordnet ist, der frei von dem Gas-/Luftgemisch ist

20. Brenner nach mindestens einem der Ansprüche 14 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Kühlvorrichtung (9) von der Zone mit der für die kritische Péclet-Zahl erforderlichen Porosität soweit entfernt ist, daß sie nicht in den Flambereich eintaucht.
21. Brenner nach Anspruch 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß eine Zündvorrichtung (6) so angeordnet ist, daß die Entflammung des Gas-/Luftgemisches in einem Bereich mit einer Porosität erfolgt, die die kritische Péclet-Zahl aufweist
22. Brenner nach einem der Ansprüche 1 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Einlaß (2) und porösem Material (5) eine Flammenfalle (4) angeordnet ist.
23. Brenner nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Flammenfalle (4) eine Platte ist, die eine Vielzahl von Löchern mit einem Durchmesser kleiner als der für die jeweiligen Brennstoffgemische kritischen "quenching" Durchmesser aufweist.
24. Brenner nach einem der Ansprüche 1 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß Einlaß (2), Auslaß (3) und poröses Material (5) so angeordnet sind, daß Kondensat durch den Auslaß (3) abfließen kann.

#### Claims

1. A burner, which is designed for a gas/air mixture as the fuel, which has a laminar flame velocity  $SL$  due to its physical properties and the design of the burner and is defined with reference to its specific heat  $c_p$ , a density  $\rho$  and a thermal conductivity  $\lambda$ , whereby in this burner a housing (1) is provided, which has a combustion space with an inlet (2) for the gas/air mixture and an outlet (3) for the exhaust gas, in which the housing (1) contains a porous material (5) with communicating voids, the porosity of which alters along the length of the combustion space, characterised in that the pore size increases in the direction of flow of the gas mixture from the inlet (2) to the outlet (3), whereby for the pore size a critical Peclet number  $(S_L d_m c_p \rho) / \lambda$  for the flame development of the gas/air mixture is produced by reason of the selected pore size in a zone (B) or at a boundary surface (7) of the porous material (5) in the combustion space, above which a flame can form and below which flame development is suppressed,  $d_m$  being the equivalent diameter of the mean void in the porous material in zone (B) or at the boundary

surface (7), whereby the flame formation on the surface (7) or in the zone (B) is determined substantially independently of operating parameters which could result in a variation of the critical Peclet number.

2. A burner as claimed in Claim 1, characterised in that the critical Peclet number is  $65 \pm 25$  and, particularly for natural gas/air mixtures, 65.
3. A burner as claimed in Claim 1 or 2, characterised in that two first and second zones (A, C) of different pore size are provided behind one another in the housing (1) in the flow direction of the gas/air mixture, between which the boundary surface (7) is situated, the first zone (A) arranged downstream of the inlet (2) having a Peclet number which is smaller than the critical Peclet number and the second zone (C) further away from the inlet (2) has a Peclet number which is larger than the critical Peclet number.
4. A burner as claimed in Claim 3, characterised in that the first zone (A) has a pore size which produces a Peclet number  $\leq 40$  and the second zone (C) has a pore size which produces a Peclet number  $\geq 90$ .
5. A burner as claimed in one of Claims 1 to 4, characterised in that the porous material is heat resistant plastic sponge, ceramic material or metal or a metal alloy.
6. A burner as claimed in Claim 5, characterised in that the porous material is heat resistant up to a temperature of  $1500^\circ\text{C}$ .
7. A burner as claimed in Claims 1 to 4, characterised in that the porous material is filling bodies, e.g. in the form of granular material, which can optionally be stabilised, for instance by sintering.
8. A burner as claimed in Claim 7, characterised in that the granular material contains metal or ceramic material, particularly steatite, Stomalox or  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
9. A burner as claimed in Claim 7 or 8, characterised in that the granular material in the vicinity of the inlet (2) comprises grains of ball-like shape with a mean diameter of 5 mm and in the subsequent region with a mean diameter  $\geq 11$  mm if, at atmospheric pressure, the diameter to reach the critical Peclet number lies between 5 and 11 mm and is, in particular, 9 mm.
10. A burner as claimed in Claims 1 to 9, characterised in that the internal surfaces of the voids in the porous material or the surfaces of the grains of the granular material are coated with a catalyst materi-

al.

11. A burner as claimed in Claims 1 to 10, characterised in that the housing (1) has at least partially a cooling device (8).
12. A burner as claimed in Claim 11, characterised in that the cooling device (8) is constructed as a cooling coil, which surrounds the housing (1) or defines it and through which a coolant, particularly water, flows.
13. A burner as claimed in Claim 12, characterised in that a monitoring device is provided which shuts off the supply of fuel into the combustion space in the event of failure of the coolant.
14. A burner as claimed in Claims 1 to 13, characterised in that a cooling device (9) is arranged for heat exchange in a region of relatively large pore openings in the material.
15. A burner as claimed in Claim 14, characterised in that the cooling device (8) of the housing (1) is connected in series with the cooling device (9) for heat exchange.
16. A burner as claimed in Claim 14 or 15, characterised in that the cooling device (9) is itself so constructed that it acts at least partially as porous material and/or replaces porous material.
17. A burner as claimed in one of Claims 14 to 16, characterised in that the spacing of the cooling device (9) from zone (B) or the boundary surface (7) with the critical Peclet number is at least so large that the cooling device (9) does not come into contact with the flame.
18. A burner as claimed in Claims 14 to 16, characterised in that the internal wall of the housing (1) is shielded from direct heat radiation, at least in the flame region, by an additional device (10), for instance by means of an insert of suitable material.
19. A burner as claimed in Claim 18, characterised in that the device (10) is arranged at a spacing from the internal wall of the housing (1) which leaves free a gap (11) which is free of the gas/air mixture.
20. A burner as claimed in one of Claims 14 to 18, characterised in that the cooling device (9) is so far away from the zone with the porosity necessary for the critical Peclet number that it does not extend into the flame region.
21. A burner as claimed in Claims 1 to 20, characterised in that an ignition device (6) is so arranged that the

ignition of the gas/air mixture occurs in a region with a porosity which has the critical Peclet number.

22. A burner as claimed in one of Claims 1 to 21, characterised in that a flame trap (4) is arranged between the inlet (2) and porous material (5).

23. A burner as claimed in Claim 22, characterised in that the flame trap (4) is a plate which has a plurality of holes with a diameter smaller than the critical "quenching" diameter for the fuel mixtures in question.

24. A burner as claimed in one of Claims 1 to 23, characterised in that the inlet (2), outlet (3) and porous material (5) are so arranged that condensate can drain away through the outlet (3).

#### Revendications

1. Brûleur conçu pour un mélange de gaz et d'air en tant que combustible, qui, en raison de ses propriétés physiques et de la conception du brûleur, présente une vitesse de flamme laminaire  $S_L$  et qui est déterminé par rapport à sa chaleur spécifique  $c_p$ , à une densité  $p$  ainsi qu'à une conductibilité thermique  $\lambda$ , dans ce brûleur étant prévu un boîtier (1) qui comporte une chambre de combustion avec une entrée (2) pour le mélange de gaz et d'air et une sortie (3) pour les gaz de combustion, dans lequel le boîtier (1) contient un matériau poreux (5) avec des pores ouvertes, dont la porosité varie le long de la chambre de combustion, caractérisé en ce que la taille des pores augmente dans le sens d'écoulement du mélange de gaz et d'air, de l'entrée (2) vers la sortie (3), donnant lieu dans une zone (B) ou sur une surface limite (7) du matériau poreux (5) dans la chambre de combustion, pour la taille des pores, à un nombre de Péclet critique ( $S_{L,d_m,c_p,p}/\lambda$ ), en raison de la taille des pores choisie, pour le développement de la flamme du mélange de gaz et d'air, nombre au-dessus duquel peut se former une flamme et au-dessous duquel le développement de la flamme est étouffé,  $d_m$  désignant le diamètre équivalent pour le pore moyen du matériau poreux dans la zone (B) ou à la surface limite (7), la formation de la flamme sur la surface (7) ou dans la zone (B) étant définie sensiblement indépendamment des paramètres de fonctionnement qui pourraient conduire à une variation du nombre de Péclet critique.
2. Brûleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le nombre de Péclet critique est égal à  $65 \pm 25$  et en particulier à 65 pour le mélange de gaz naturel et d'air.

3. Brûleur selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que sont prévues dans le boîtier (1) deux zones (A, C), une première et une deuxième, situées l'une derrière l'autre dans le sens d'écoulement du mélange de gaz et d'air, de tailles de pores différentes, entre lesquelles se trouve la surface limite (7), la première zone (A), située en aval de l'entrée (2) présentant un nombre de Péclet qui est inférieur au nombre de Péclet critique, et la deuxième zone (C), plus éloignée de l'entrée (2), présentant un nombre de Péclet, qui est supérieur au nombre de Péclet critique.

4. Brûleur selon la revendication 3, caractérisé en ce que la première zone (A) présente une taille de pores, qui conduit à un nombre de Péclet  $\leq 40$  et la deuxième zone (C) présente une taille de pores qui conduit à un nombre de Péclet  $\geq 90$ .

5. Brûleur selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le matériau poreux est une matière plastique spongieuse résistante à la chaleur, une céramique ou un métal ou un alliage de métaux.

6. Brûleur selon la revendication 5, caractérisé en ce que le matériau poreux est résistant à la chaleur jusqu'à une température de 1 500 °C.

7. Brûleur selon les revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le matériau poreux est constitué de matériaux de garnissage, par exemple sous la forme d'un produit en vrac, qui peut éventuellement être consolidé, par exemple par frittage.

8. Brûleur selon la revendication 7, caractérisé en ce que le produit en vrac contient du métal ou de la céramique, en particulier de la stéatite, du stémalox ou  $Al_2O_3$ .

9. Brûleur selon la revendication 7 ou 8, caractérisé en ce que le produit en vrac est constitué, à proximité de l'entrée (2), de grains de forme ressemblant à des billes d'un diamètre moyen de 5 mm et dans la zone suivante, de diamètre moyen  $\geq 11$  mm, lorsqu'à la pression atmosphérique, le diamètre pour obtenir le nombre de Péclet critique se situe entre 5 et 11 mm et est en particulier égal à 9 mm.

10. Brûleur selon les revendications 1 à 9, caractérisé en ce que les faces intérieures des pores du matériau poreux ou les surfaces des grains du produit en vrac sont recouvertes d'un matériau catalyseur.

11. Brûleur selon les revendications 1 à 10, caractérisé en ce que le boîtier (1) présente au moins en partie un dispositif de refroidissement (8).

12. Brûleur selon la revendication 11, caractérisé en ce

que le dispositif de refroidissement (8) est conforme en serpentin de refroidissement entourant le boîtier (1) ou formant celui-ci, à travers lequel s'écoule un réfrigérant en particulier de l'eau.

13. Brûleur selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'est prévu un dispositif de contrôle, qui bloque l'arrivée de combustible dans la chambre de combustion, en cas de manque de réfrigérant.

14. Brûleur selon les revendications 1 à 13, caractérisé en ce qu'un dispositif de refroidissement (9) est prévu pour l'échange de chaleur dans une zone de plus grande ouverture des pores du matériau.

15. Brûleur selon la revendication 14, caractérisé en ce que le dispositif de refroidissement (8) du boîtier (1) est monté en série avec le dispositif de refroidissement (9) pour l'échange de chaleur.

16. Brûleur selon la revendication 14 ou 15, caractérisé en ce que le dispositif de refroidissement (9) lui-même est conçu de manière à agir au moins partiellement en tant que matériau poreux et/ou à remplacer le matériau poreux.

17. Brûleur selon l'une des revendications 14 à 16, caractérisé en ce que la distance entre le dispositif de refroidissement (9) et la zone (B) ou la surface limite (7) présentant le nombre de Péclet critique, est au moins suffisamment grande pour que le dispositif de refroidissement (9) ne vienne pas en contact avec la flamme.

18. Brûleur selon les revendications 14 à 16, caractérisé en ce que la paroi intérieure du boîtier (1) est protégée contre le rayonnement thermique direct, au moins dans la zone de la flamme, par un dispositif (10) supplémentaire, par exemple par un insert fait d'un matériau approprié.

19. Brûleur selon la revendication 18, caractérisé en ce que le dispositif (10) est disposé à une distance de la paroi intérieure du boîtier (1), laissant libre une fente (11), qui est exempte du mélange de gaz et d'air.

20. Brûleur selon l'une au moins des revendications 14 à 18, caractérisé en ce que le dispositif de refroidissement (9) est suffisamment éloigné de la zone présentant la porosité nécessaire pour le nombre de Péclet critique, pour qu'il ne pénètre pas dans la zone de la flamme.

21. Brûleur selon les revendications 1 à 20, caractérisé en ce qu'un dispositif d'allumage (6) est disposé de manière que l'inflammation du mélange de gaz et d'air se produise dans une zone avec une porosité

qui présente le nombre de Péclet critique.

22. Brûleur selon l'une des revendications 1 à 21, caractérisé en ce qu'un piège à flamme (4) est disposé entre l'entrée (2) et le matériau poreux (5).

23. Brûleur selon la revendication 22, caractérisé en ce que le piège à flamme (4) est une plaque, qui présente un grand nombre de trous d'un diamètre inférieur au diamètre d'extinction critique pour les mélanges combustibles respectifs.

24. Brûleur selon l'une des revendications 1 à 23, caractérisé en ce que l'entrée (2), la sortie (3) et le matériau poreux (5) sont disposés de manière que le condensat puisse s'écouler à travers la sortie (3).

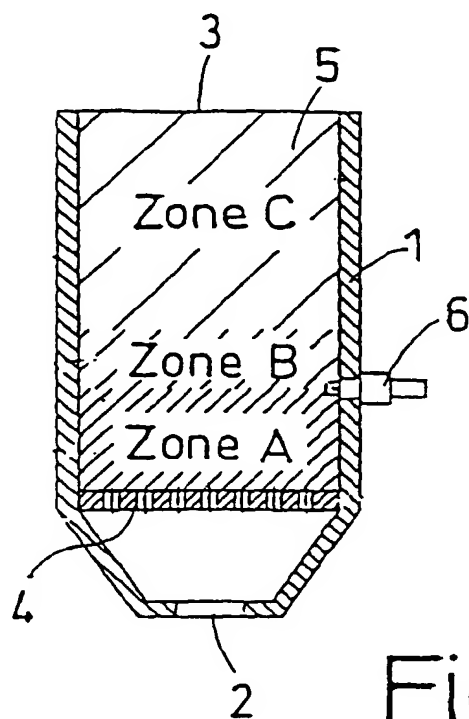


Fig.1

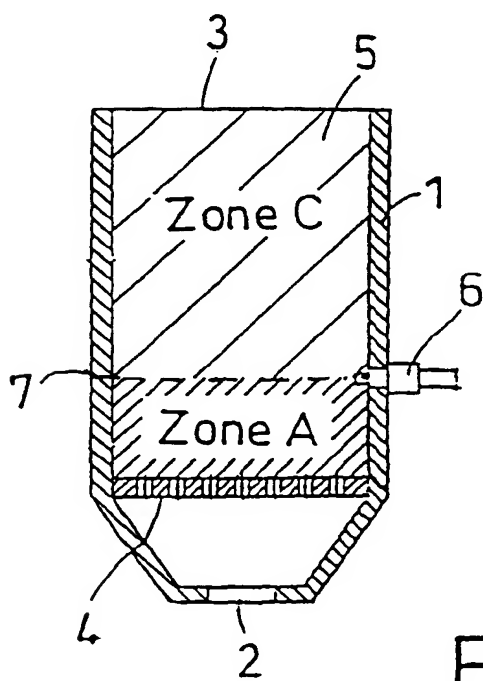


Fig.2

Fig. 3

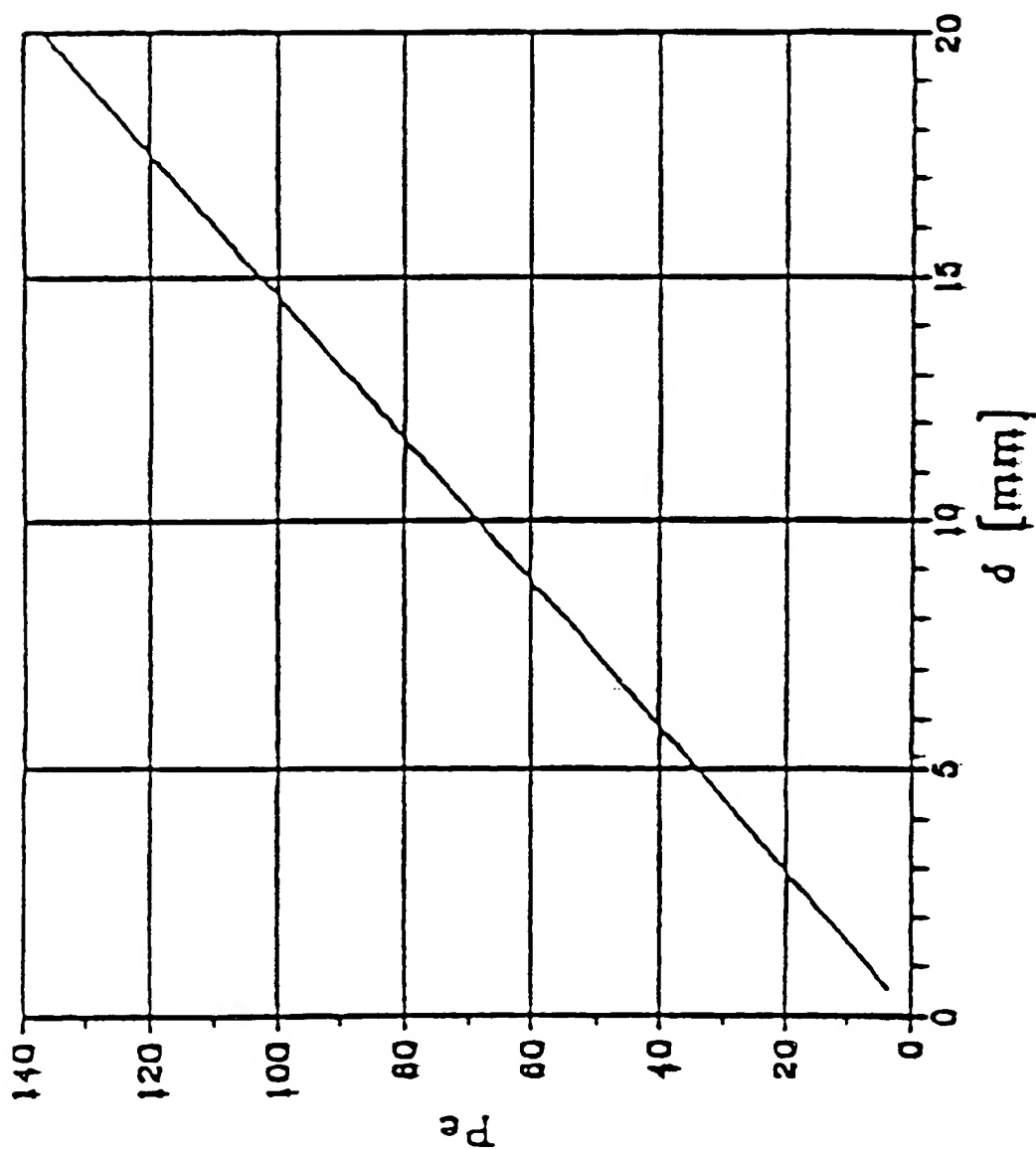
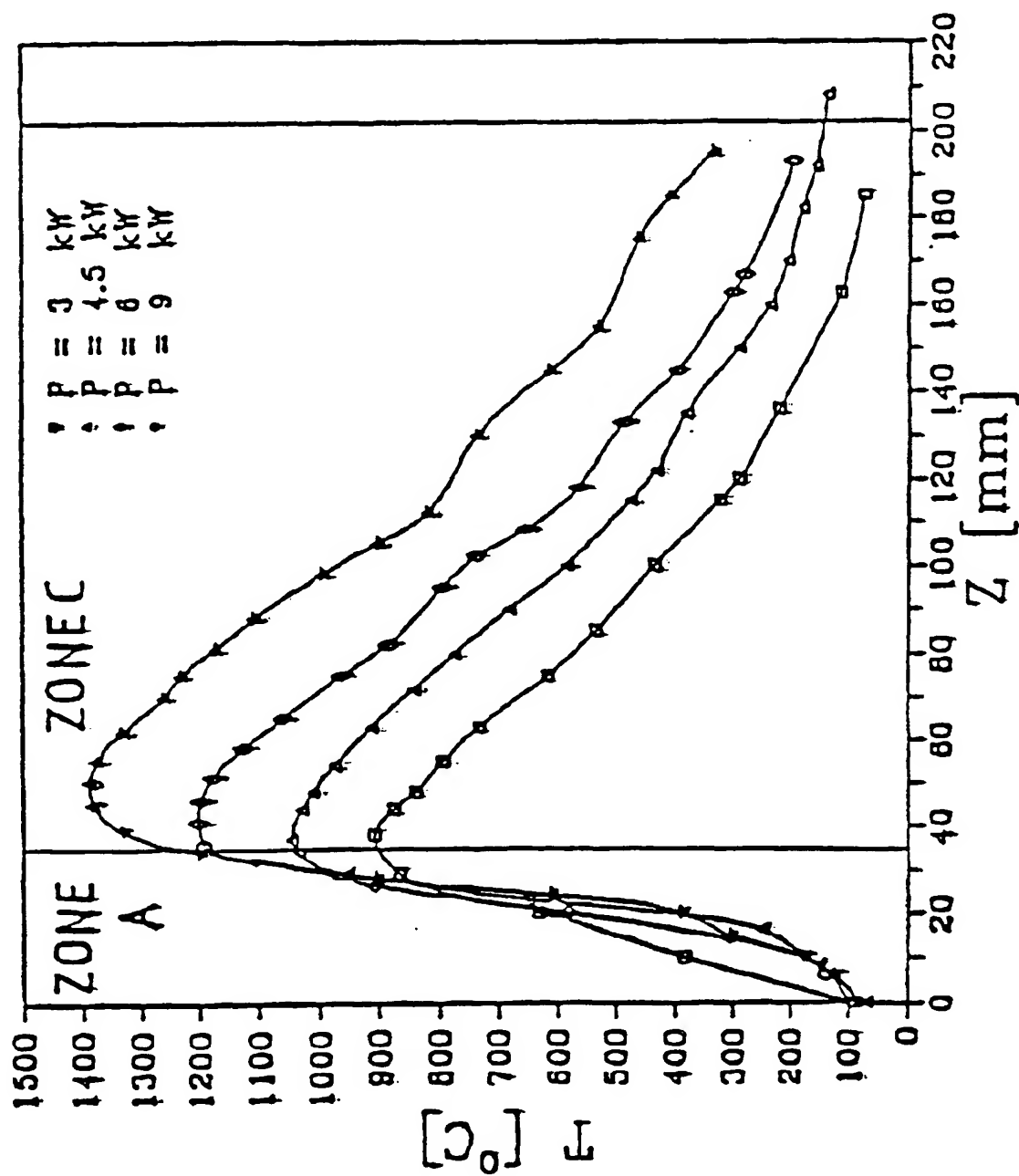




Fig. 4



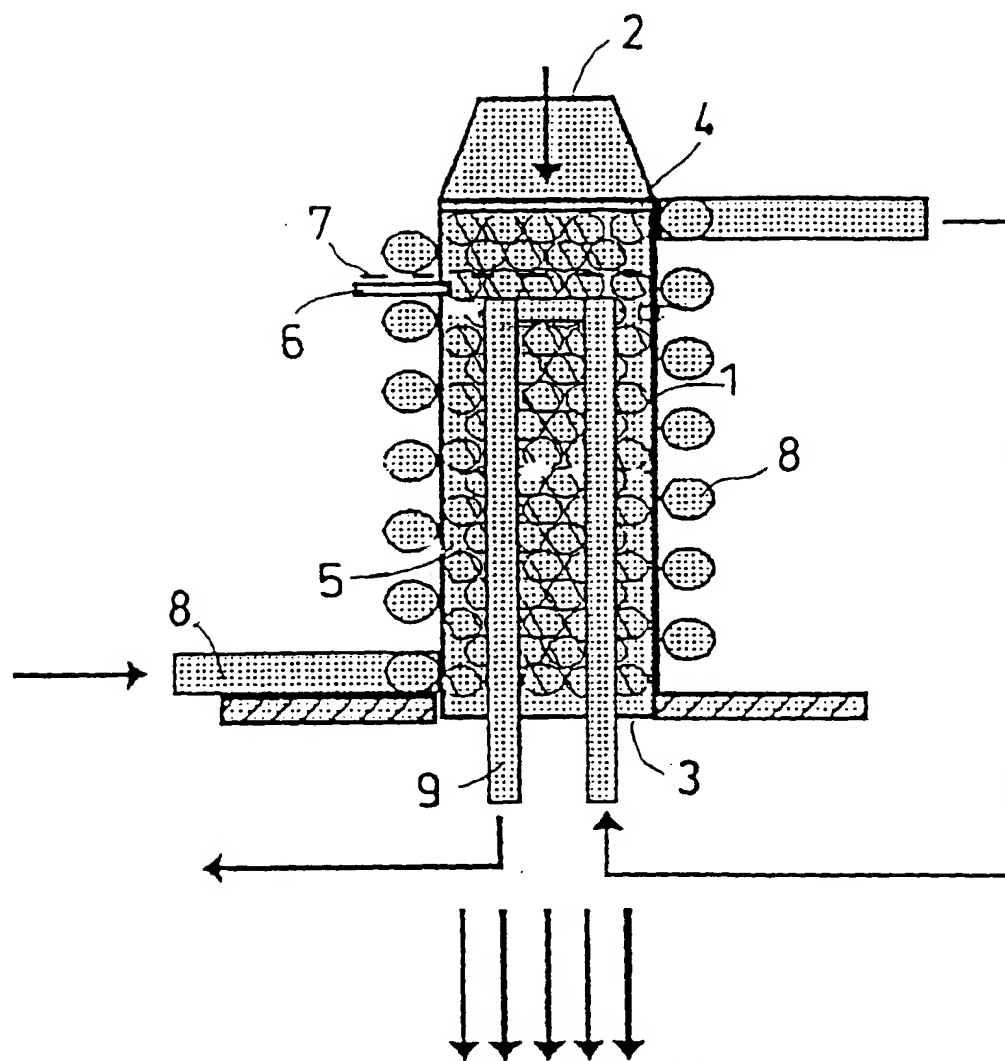


Fig.5

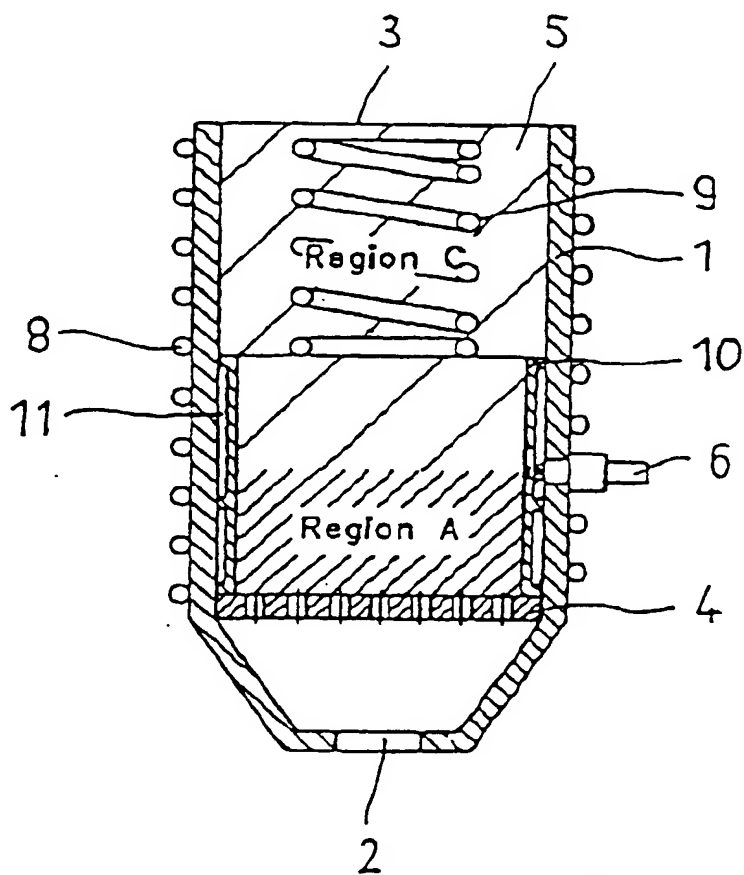


Fig. 6